

# 基于时差频差的无人机群协同侦察定位算法

吕洁, 杨玫, 杜晶

(海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 在我国的海洋目标侦察监视中, 无人机定位技术具有灵活性好、定位范围大的优势, 但在多无人机群协同定位方面, 还存在着定位精度不高、动态规划航路的效率较低等问题。为提高无人机群的定位精度, 提升远海区域的海上目标侦察和监视能力, 研究了基于无源信号的时差频差数据的多无人机协同定位问题, 并对算法进行了仿真和对比以及误差分析。最后, 对多无人机协同定位侦察进行了展望。

**关键词:** 无人机; 时差; 频差; 协同定位

中图分类号: TN966

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191020

中文引用格式: 吕洁, 杨玫, 杜晶. 基于时差频差的无人机群协同侦察定位算法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 79-82, 87.

英文引用格式: Lv Jie, Yang Mei, Du Jing. Cooperative reconnaissance and location algorithm of UAV cluster based on TDOA and FDOA[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(5): 79-82, 87.

## Cooperative reconnaissance and location algorithm of UAV cluster based on TDOA and FDOA

Lv Jie, Yang Mei, Du Jing

(School of Aviation Foundation, Naval Aeronautical University, Yantai 264000, China)

**Abstract:** In our country's marine target reconnaissance and surveillance, UAV positioning technology has the advantages of good flexibility and large positioning range, but in the multi-UAV group coordinated positioning, there are still some problems, such as low positioning accuracy, low efficiency of dynamic route planning and so on. In order to improve the positioning accuracy of UAV fleet, effectively compensate for the blind areas of satellite and radar reconnaissance, and enhance the ability of target reconnaissance and surveillance at sea, this paper studies the cooperative positioning of multiple UAVs and dynamic route planning based on the results of time difference and frequency difference processing of passive signals, and simulates and verifies the model and error analysis. The prospects of cooperative positioning and reconnaissance of multiple UAVs are presented.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV); time difference of arrival (TDOA); frequency difference of arrival (FDOA); cooperative positioning

### 0 引言

随着军用电子技术的飞速发展, 战场目标的精确定位在现代化战争中的地位和作用不断提高<sup>[1]</sup>。我国海洋安全形势非常严峻, 迫切需要提高我军的海洋目标侦察监视能力。

在当前强调隐蔽攻击和硬杀伤的形势下, 采用被动方式工作的无人机协同定位技术是现代一体化防空系统、机载对敌、对海攻击以及对付隐身目标的远程预警系统的重要组成部分, 对于提高武器系统在电子战环境下的生存能力和作战能力具有重要作用, 同时在航海、航空、宇航、侦察、测控、救援中也扮演着重要的角色<sup>[2]</sup>。

本文提出根据多架无人机同步采集信号建立时差频差定位模型来实时分析获取目标源位置的方案。该无源定位方案能够快速准确地判断辐射源位置并做出误差分析。

### 1 背景分析

现 2 架无人机在侦察监视区域执行通信侦察巡航任务, 同步采集目标辐射源 (如通信电台等) 电磁信号。根据无人机的初始位置和飞行速度信息, 确定辐射源的位置, 并分析定位误差。

#### 1.1 信号表示

无人机接收到的电信号是电压随时间变化的实信号。通信中为了提高频谱的利用率, 将两路独立的基带信号  $S_1(t)$  和  $S_0(t)$ , 分别用  $\cos 2\pi ft$  和  $\sin 2\pi ft$  的载波调制到以  $f$  为中心频率的频段上, 再放大通过天线发射出去, 如图 1 所示。则发射信号随时间变化如式 (1) 所示:

$$S(t) = S_1(t)\cos 2\pi ft + S_0(t)\sin 2\pi ft \quad (1)$$

无人机机载接收机在接收信号时, 将接收到的实信号  $S(t)$  分别乘以正交载波  $\cos 2\pi ft$  和  $\sin 2\pi ft$ , 再通过低通滤波器 (LPF), 即可还原出两路原始信号, 如图 2 所示。

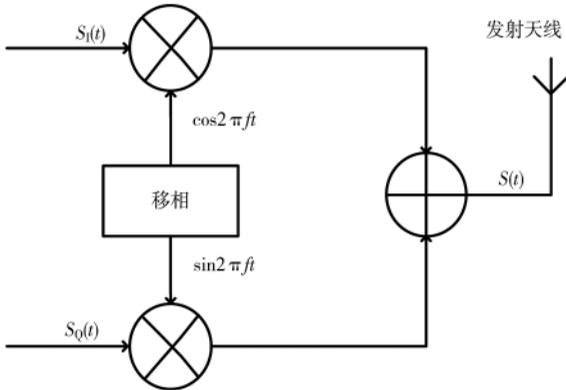


图1 正交调制信号

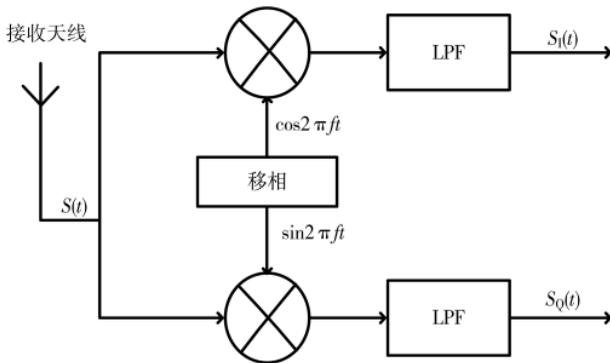


图2 还原接收信号

1.2 信号传播模型

电磁波从天线中发射出来后,经过衰减、延迟和加噪声后被接收天线接收,其传播模型为:

$$r_i(t) = \mu_i \cdot s(t - \tau_i) e^{j2\pi f_i t} + n_i(t) \quad (2)$$

其中,  $r_i(t)$  是在  $t$  时刻第  $i$  架无人机接收的信号,  $s(t)$  是在  $t$  时刻的发送信号,  $\tau_i$  是从信号源到无人机  $i$  的路径传播延迟,  $\mu_i$  是从信号源到无人机  $i$  的传播路径增益系数,  $f_i$  是由于多普勒频移导致的频率漂移值,  $n_i(t)$  是  $t$  时刻的复噪声。

2 无人机协同定位

2.1 定位过程框架

无人机采样过程中,通过同步设备实现同步采集和标记时戳,然后利用无人机组成的多跳网络,将采集的数字信号通过无人机网关回传到后方控制中心<sup>[3]</sup>。控制中心的解算中心根据各无人机回传的信号和无人机的位置、速度等信息,建立定位方程并求解,即可计算出可疑辐射源的位置,完成对可疑辐射源的定位。

多站无源定位问题常用的定位方法有测向交叉定位法、时差定位法、频差定位法和混合法等<sup>[4-5]</sup>。本文采用双机时差频差定位模型对辐射源进行定位,即根据两架无人机接收信号的时间差和频率差,并结合无人机的位置和速度信息,得到可疑辐射源的位置信息。

同一信号源被不同无人机的机载接收机接收后,由于路径增益复系数  $\mu_i$ 、延迟  $\tau_i$ 、信噪比 SNR 和频率漂移

$f_i$  等因素影响导致其存在时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)和频率差(Frequency Difference of Arrival, FDOA),双机时差频差定位模型就是利用两架无人机接收同一辐射源信号所产生的时差与频差信息,分别建立 TDOA 方程和 FDOA 方程,求解该方程可得辐射源的位置信息,其总体流程如图 3 所示。

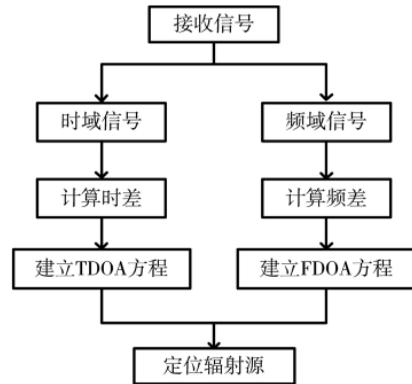


图3 时差频差定位算法流程图

2.2 定位算法

2.2.1 时差

时差的获取一般有两种方法:(1)利用信号到达两架无人机的时间,取其差值来获得,这时需要两架无人机机载接收机的时间严格同步;(2)将两架无人机接收到的信号进行互相关运算<sup>[6]</sup>。设两架无人机接收信号分别为  $r_1$  和  $r_2$ ,  $N$  是信号的采样点数,定义自相关函数如下:

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r_1(n)r_2(n+k) \quad (3)$$

其中,  $k = -N+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1$ ,  $r(n)$  为接收的离散信号(如式(2)所示),信号的长度为  $2N-1$ 。取其峰值处的时间可得时差  $\Delta t$ ,这种方法可以在辐射源与无人机不同步时估计出时差值,在实际应用中,很难做到辐射源与无人机之间的同步,利用相关估计得到时差值能获得较高精度。

2.2.2 频差

根据式(3)的自相关函数,得到两个自相关函数的比为:

$$\xi(n) = \frac{y_2(n)}{y_1(n)} \quad (4)$$

计算出  $\xi(n)$  并对其进行傅里叶变换,再取其峰值处的频率即得频差  $\Delta f$ 。

2.2.3 定位

假设辐射源的高度已知为  $z$ ,在以地面后方控制中心为原点的三维直角坐标系中建立模型。目标是确定辐射源的坐标。设辐射源的坐标为  $X=(x, y, z)^T$ ,两架无人机的初始坐标位置为  $X_1=(x_1, y_1, z_1)^T$ ,  $X_2=(x_2, y_2, z_2)^T$ ,且初始位置已知。两架无人机的速度分别为  $V_1=(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1})^T$ ,  $V_2=(v_{x2}, v_{y2}, v_{z2})^T$ ,且初始速度已知,如图 4 所示。

设两架无人机接收信号的时差为  $\Delta t$ ,频差为  $\Delta f$ ,已知光速为  $c$ ,信号的波长为  $\lambda$ ,则有时差定位 TDOA 方程和

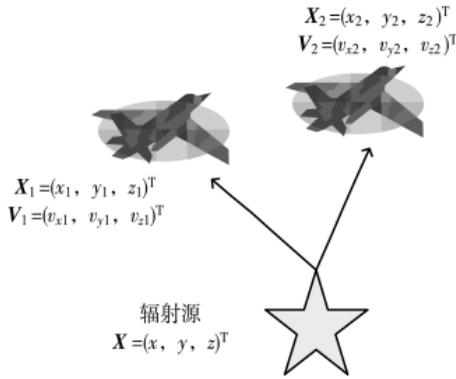


图4 场景示意图

频差定位 FDOA 方程<sup>[7-8]</sup>如下:

$$|X-X_1|-|X-X_2|=c\Delta t \quad (5)$$

$$\frac{(X-X_1)^T V_1}{|X-X_1|} - \frac{(X-X_2)^T V_2}{|X-X_2|} = \lambda \Delta f \quad (6)$$

在假设辐射源高度已知为  $z$  的情况下,通过上述时差、频差方程确定目标位置。引入变量  $s_1, s_2$ , 分别表示目标  $T$  与两无人机的视距(Line of Sight, LOS), 即:

$$s_1=|X-X_1|=\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2} \quad (7)$$

$$s_2=|X-X_2|=\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2} \quad (8)$$

将式(7)和式(8)代入式(5)和式(6), 可得:

$$s_1-s_2=\Delta s=c\Delta t \quad (9)$$

$$\frac{(x-x_1)v_{x1}+(y-y_1)v_{y1}+(z-z_1)v_{z1}}{r_1} - \frac{(x-x_2)v_{x2}+(y-y_2)v_{y2}+(z-z_2)v_{z2}}{r_2} = \lambda \Delta f \quad (10)$$

通过解方程组计算得到目标辐射源位置。

### 3 实验

本文算法的实验数据由 MATLAB 每次随机生成。各无人机机载接收机以 1 s 的等时间间隔采集信号, 每次采集用时 43.7 ms, 共收集 131 072 个采样。为便于问题求解, 假设信号源是静止的情况, 并且通信侦察巡航任务期间, 无人机群只受到固定信号源的干预, 期间不再接收其他任何信号源信号。

本文利用 MATLAB 算法进行仿真, 相关参数: 信号载频为 315.425 MHz, 采样速率为 3 MHz, 同步误差为 20 ns(1 个标准差), 信号时长为 43.7 ms。

数据采集模式: 正交下变频到零频后正交采样的复信号数据。对两路信号采样, 分别存储在复数的实部和虚部, 信号用复数表示, 图 5 为 MATLAB 仿真生成的时域信号数据。

data1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
2x131072 complex double		1	2.2360 - 2...	0.4164 + ...	0.1127 + ...	1.9901 - 3...	3.6226 + ...	5.0746 - 1...	-3.9880 - ...	4.4202 + ...	-9.4829 + ...	0.3041 + ...	1.2645 + ...
		2	0.9405 - 6...	4.8190 - 0...	-2.5275 + ...	7.8527 - 1...	5.8938 - 3...	-2.5441 - ...	-5.2859 + ...	2.1008 + ...	5.1303 + ...	-3.3417 + ...	2.420
		3											

图5 原始数据

对时域信号进行傅里叶变换, 转化为频域信号, 如图 6~图 9 所示。

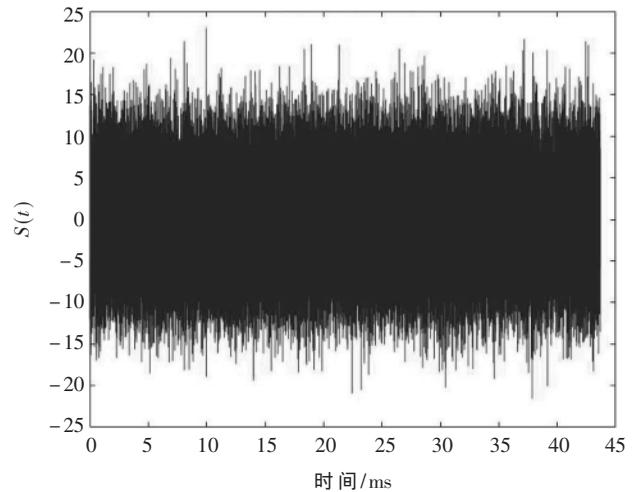


图6 无人机1接收信号(时域信号)

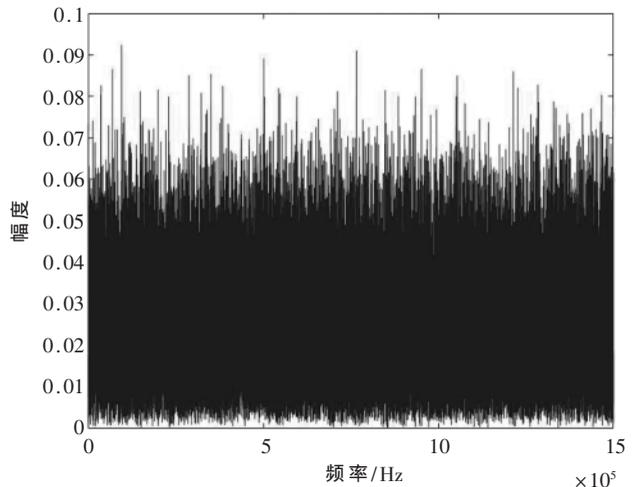


图7 无人机1幅度-频率曲线图(频域信号)

利用该模型解决两架无人机精确定位辐射源位置的问题, 并用 MATLAB 仿真估计出辐射源的大致位置坐标为(109 765, 32 701, 0)。

本算法误差来自两个方面: (1)两架无人机位置和速度的测量误差, (2)双机时差频差定位算法带来的误差。

假设两架无人机位置的测量误差为  $dX_1=(d_{x1}, d_{y1}, d_{z1})^T$  和  $dX_2=(d_{x2}, d_{y2}, d_{z2})^T$ , 两架无人机速度的测量误差是  $dV_1=(dv_{x1}, dv_{y1}, dv_{z1})^T$  和  $dV_2=(dv_{x2}, dv_{y2}, dv_{z2})^T$ , 算法带来的时差误差和频差误差分别是  $\delta\Delta t$  和  $\delta\Delta f$ , 设  $dX=(dx, dy, dz)^T$ , 对 TDOA 方程(式(5))进行全微分<sup>[9-10]</sup>, 认为 TDOA 方程的

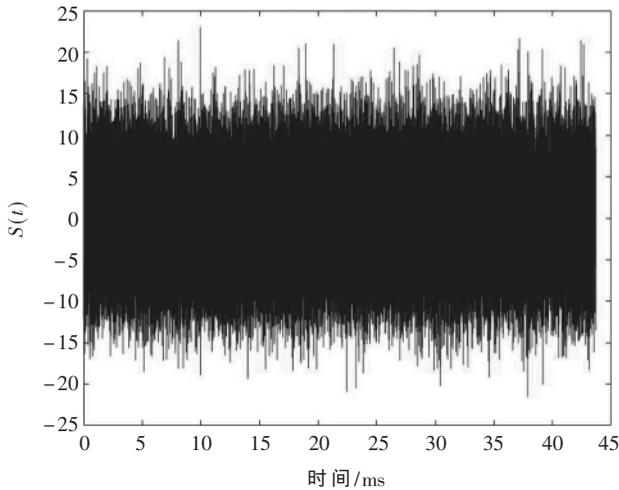


图8 无人机2接收信号(时域信号)

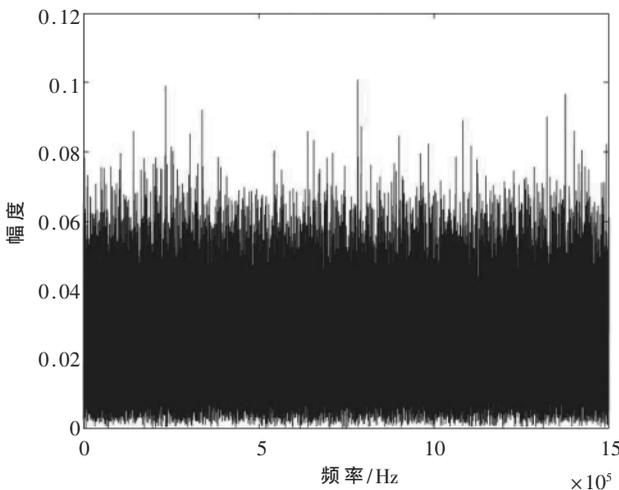


图9 无人机2幅度-频率曲线图(频域信号)

增量为误差,得:

$$(G_1 - G_2)^T \cdot dX = c \cdot \delta \Delta t + G_1^T \cdot dX_1 - G_2^T \cdot dX_2 \quad (11)$$

其中:

$$G_1 = \frac{X - X_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}} \quad (12)$$

$$G_2 = \frac{X - X_2}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2}} \quad (13)$$

对 FDOA 方程(式(6))进行全微分,得到:

$$(G_1 - G_2)^T \cdot dX = \lambda \cdot \delta \Delta f + C_1^T \cdot dX_1 - C_2^T \cdot dX_2 - G_1^T \cdot dV_1 + G_2^T \cdot dV_2 \quad (14)$$

其中:

$$C_1 = \frac{|X - X_1|^2 \cdot V_1 - (X - X_1)(X - X_1)^T \cdot V_1}{|X - X_1|^3} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{|X - X_2|^2 \cdot V_2 - (X - X_2)(X - X_2)^T \cdot V_2}{|X - X_2|^3} \quad (16)$$

假设所有误差均相互独立,两架无人机的位置和速度测量误差协方差阵分别相同,  $R_x = E[dX_1 \cdot dX_1^T] = E[dX_2 \cdot dX_2^T]$ ,  $R_v = E[dV_1 \cdot dV_1^T] = E[dV_2 \cdot dV_2^T]$ , 所以定位误差协方

差阵为:

$$P_x = E[dX \cdot dX^T] = C^{-1} \cdot [R_x + U \cdot R_x \cdot U^T + W \cdot R_x \cdot W^T + G \cdot R_v \cdot G^T + H \cdot R_v \cdot H^T] \cdot (C^{-1})^T \quad (17)$$

其中,  $C = [C_1 - C_2, G_1 - G_2]^T$ ,  $U = [C_1, G_1]^T$ ,  $W = [C_2, G_2]^T$ ,  $G = [G_1, 0]^T$ ,  $H = [G_2, 0]^T$ 。

此外,信号传播过程中的噪音也会对定位有影响。不同无人机与信号源的距离不同,无人机距离信号源越远,信号衰减越大,无人机收到的信号功率越小,在相同的背景噪声功率谱密度条件下,信噪比越低<sup>[11]</sup>。

传统测向交叉定位采用的是干涉仪测角原理,根据多无人机测量的电磁波方向,按三角测量法交会计算出辐射源位置(126 714, 27 834, 0)。通过对两种算法进行多次实验,将结果与设定真实位置相比,测向交叉定位本算法比本文算法的误差高出 5.8%,可以证明本文算法具有一定的有效性。

#### 4 结论

时差频差定位克服了单站无源定位的缺陷,与传统的测向交叉定位相比具有较高的定位精度,并且最少只需要 2 架无人机就可以完成。本研究与传统方法相比,均能达到相同定位精度,但本方法在定位模型算法一定的情况下,对目标定位和跟踪的精度受到各个无人机与目标之间构型的影响,在实际应用中,需要不断调整与目标之间的相对构型,从而得到更好的定位精度以及定位的稳定性。

按照以上改进思路进行下一步工作的研究,提高整体的适用范围和精确度。首先,在解决的问题深度方面,继续考虑移动辐射源和多个辐射源的协同定位问题。其次,在算法改进方面,考虑学习基于智能化机器学习的思路,实现精确高效地解决无人机群协同定位问题。

#### 参考文献

- [1] POISEL R A. 电子战目标定位方法[M]. 屈晓旭, 罗勇, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [2] 贾兴江. 运动多站无源定位关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [3] 盛蔚, 黄伟杰. 民用无人机多通道数传交换系统设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(12): 77-80, 84.
- [4] 汤一鑫. 无人机航迹规划策略与仿真的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] 李世晓, 朱凡, 刘希, 等. 基于协同进化的多无人机航迹规划研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 96-100.
- [6] 杨发权. MATLAB 通信系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [7] 孙学军. 通信原理教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [8] 张文. 无人机时差频差定位关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [9] 席庆彪, 苏鹏, 刘慧霞. 基于 AI 算法的无人机航路规划算法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(11): 5-9.

(下转第 87 页)

# 嵌入式技术 Embedded Technology

(3)若位 11 不为 0,表示没有收到数据包,退出循环;

(4)若已经停止接收,需要重新启动接收,读取 MAC 控制字;

(5)若位 1 为 0,表示已停止接收,要重新启动接收,将接收描述符起始地址写到接收描述符寄存器,然后将 MAC 控制字位 1 置 1,启动当前描述符块的接收。返回步骤(1)。

以上操作共进行 6 次 UM-BUS 总线设备访问。

## 3 驱动程序的测试

### 3.1 测试环境

为了验证 UM-BUS 总线网卡驱动的正确性和有效性,测试系统由一台装有 UM-BUS 总线扩展卡的 PC 器、一个 UM-BUS 总线扩展卡以及一台标准 PC 组成,通过 UM-BUS 总线连接。测试环境所使用的操作系统均为 Linux。

### 3.2 网卡驱动程序测试

#### 3.2.1 连通性测试

按照测试环境的组织方式连接成功后,将编写好的驱动程序编译进内核并执行,执行 ifconfig 指令查看相关的以太网网卡信息,通过执行 ping 命令,两边是可以互通的。具体如图 9 所示<sup>[9]</sup>。

```
root@zhou:/home/zhou/Desktop/vnet-lnt-1# ping -I vnet_2 192.168.1.18
PING 192.168.1.18 (192.168.1.18) from 192.168.1.15 vnet_2: 56(84) bytes of data:
64 bytes from 192.168.1.18: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.834 ms
64 bytes from 192.168.1.18: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.350 ms
64 bytes from 192.168.1.18: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.483 ms
```

图 9 测试结果图

采用第三方软件飞鸽传书进行传输文件测试,传输文件大小为 2 GB,传输 100 次,没有出现丢包情况;采用 HTTP 浏览网页功能均正确。

#### 3.2.2 传输性能测试

进行 UDP 通信,使用 Wireshark 抓包工具进行监测,主控设备 IP 地址为 192.168.1.18,目标设备 IP 地址为 192.168.1.15。具体如图 10 所示。

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1607.	2231.1221685.	192.168.1.15	192.168.1.18	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1227504.	192.168.1.15	192.168.1.18	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1233741.	192.168.1.15	192.168.1.18	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1239590.	192.168.1.15	192.168.1.18	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1245597.	192.168.1.15	192.168.1.18	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1262371.	192.168.1.18	192.168.1.15	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1264732.	192.168.1.18	192.168.1.15	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1264814.	192.168.1.18	192.168.1.15	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1267369.	192.168.1.18	192.168.1.15	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460
1607.	2231.1267446.	192.168.1.18	192.168.1.15	UDP	1502	49153 -> 49153 Len=1460

图 10 UDP 通信测试结果图

UDP 包传输情况如表 1 所示。传输文件为 10 GB,平均传输速率为 3.787 MB/s,没有出现丢包情况,传输过

(上接第 82 页)

[10] 刘慧娟.基于蚁群算法的多飞行器协同目标搜索航迹规划[D].武汉:华中科技大学,2014.

[11] 向敏,牛立强,武沛羽,等.复杂电磁环境下无人机的雷达散射特性研究进展[J].电子技术应用,2019,45(6):

《电子技术应用》2020年第46卷第5期

表 1 传输情况统计表

传输文件大小/GB	平均传输速度/(MB/s)	丢包情况	错误情况
10	3.787	0	0

程中未发现数据错误。

## 4 结论

本文提出一种适用于基于 UM-BUS 总线连接的以太网网卡驱动程序的设计方法,能够实现跨多种总线进行设备访问,在百兆网情况下,传输速率可以达到 3.787 MB/s,从而实现基于 UM-BUS 总线的 CPS 系统与其他 CPS 系统和云服务互联。

## 参考文献

- [1] 张伟功,周继芹,李杰,等.UM-BUS 总线及接入式体系结构[J].电子学报,2015,43(9):1776-1785.
- [2] 李仁发,谢勇,李蕊,等.信息-物理融合系统若干关键问题综述[J].计算机研究与发展,2012,49(6):1149-1161.
- [3] 罗革新,张中杰,孙仕胜,等.基于 Linux 虚拟网卡技术构建数传电台 TCP/IP 通信平台的研究[J].电子技术与软件工程,2015(7):38-39.
- [4] 袁安富,夏生凤.基于 ARM 和 Linux 的 DM9000 网络接口设计及驱动实现[J].计算机工程与科学,2011,33(2):27-31.
- [5] 常锋,孟传良.基于 ARM-Linux 的网络驱动程序设计与实现[J].通信技术,2012(6):36-39.
- [6] 龙新辉,陈俊杰.基于嵌入式 Linux 的以太网网卡驱动设计与实现[J].舰船电子工程,2011(3):149-152.
- [7] 谢红薇,宋春燕.嵌入式 Arm-Linux 系统的网卡驱动程序的分析与实现[J].电脑开发与应用,2012(4):54-57.
- [8] 张洪,吴钦章,杜春蕾.基于 Linux 虚拟网卡测试平台的系统设计[J].电子设计工程,2016,24(17):96-97.
- [9] 高嵩,纪超,陈超波.基于嵌入式 Linux 的 DM9000 网络驱动设计[J].计算机与数字工程,2013(2):156-158.

(收稿日期:2020-02-24)

## 作者简介:

张霖(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:高可靠嵌入式系统。

周继芹(1978-),女,博士研究生,主要研究方向:计算机系统体系结构与性能评价。

张伟功(1967-),通信作者,男,研究员,博士生导师,主要研究方向:嵌入式系统体系结构、高效能计算、高可靠通信总线。

1-6,10.

(收稿日期:2019-09-17)

## 作者简介:

吕洁(1988-),女,硕士研究生,讲师,主要研究方向:无线电信号、人工智能。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所